

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(НИУ «БелГУ»)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
КАФЕДРА МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

**СПОСОБ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
УЛЬТРАНИЗКОФОНОВОГО ТИТАНА ЭЛП БЕЗ ВНЕСЕНИЯ
РАДИАЦИОННЫХ ПРИМЕСЕЙ**

Выпускная квалификационная работа
обучающейся по направлению подготовки
28.03.03 Наноматериалы
очной формы обучения группы 07001416
Сухоруковой Юлии Витальевны

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доцент Никулин И. С.

БЕЛГОРОД 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	4
1.1 Титан и его сплавы	4
1.2 Механизм деформации путем двойникования.....	10
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
2.1 Техника безопасности и охрана труда.....	13
2.2 Метод акустической эмиссии.....	15
2.3 Определение модуля упругости.....	17
2.4 Методика работы на оптическом микроскопе.....	19
2.5 EBSD анализ.....	20
2.6 Методика измерения твердости с помощью динамического микротвердомера.....	21
2.7 Подготовка образцов.....	23
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.....	25
3.1 Акустическая эмиссия.....	25
3.2 Измерения Юнга модуля и микротвердости.....	27
3.3 EBSD анализ.....	29
3.4 Экономическое обоснование внедрения разработки.....	39
ВЫВОДЫ.....	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	43

Введение

Титан и его сплавы нашли большое применение в авиакосмической, кораблестроительной, химической и других отраслях промышленности. Большая коррозионная стойкость, легкость, прочность, хорошее сопротивление усталостному разрушению являются основными преимуществами среди других материалов. Благодаря высокой биосовместимости, титан на данный момент широко применяется в медицинской отрасли.

В связи с возросшим интересом к титановым и циркониевым сплавам, вновь возник интерес к исследованию процесса образования и роста механических двойников и тема исследование влияния малоугловых границ на процесс двойникования в титане, является актуальной на сегодняшний день.

Цель данной работы – исследовать взаимодействие механических двойников в образцах крупнозернистого титана с различными типами границ зерен.

Основные задачи выпускной квалификационной работы:

- разработать методику создания и подготовки образцов для проведения испытания;
- методом акустической эмиссии исследовать образование и рост клиновидных двойников, и их взаимодействие с малоугловыми границами;
- с помощью метода EBSD определить разориентировки зерен и двойников в области укола

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Титан и его сплавы

Титан (Ti) - химический элемент, порядковый номер которого в таблице Менделеева 22, а атомная масса 47.88 г/моль. Это легкий серебристо-белый металл с плотностью равной 4,51 г/см³ (для технического титана марок ВТ1-00 и ВТ1-0 плотность приблизительно равна 4,32 г/см³). Температура плавления для данного металла приблизительно равна 1665 °С, а температура кипения 3260 °С. Титан и его сплавы совмещают в себе прочную и легкую структуру, низкий коэффициент теплового расширения, высокую коррозионную стойкость, хорошая термостойкость. У. Грегор в 1789 году при изучении магнитного железистого песка, выделил окись неизвестного металла, назвав ее менакеновой, позднее оксидом титана TiO₂. Й. Я. Берцелиусом в 1825 году впервые был получен образец металлического титана. Основные и наиболее стабильные соединения содержат четырехвалентный титан, который по своему внешнему виду он сходен со сталью. Однако титан - это переходным металл, который имеет высокую температуру плавления (1668±4 °С) и кипение начинается при 3300 °С и его скрытая теплота плавления и испарения практически в два раза превосходит железо.

Известны две модификации титана. Низкотемпературная альфа-модификация, которая существует при температурах до 882 °С и высокотемпературная бета-модификация, которая устойчива при температурах от 882 °С до температуры плавления.

По механической прочности титан в шесть раз превышает алюминий и в два раза превышает железо. А по удельной теплоемкости и плотности он занимает промежуточное место среди таких двух основных конструкционных металлов как алюминия и железа. Однако его способность образовывать тугоплавкие карбиды, оксиды и нитриды, обладающие

существенной прочностью, сильно понижают пластические свойства металла. Титан имеет низкую теплопроводность, которая в 4 раза ниже теплопроводности железа и в 13 раз ниже теплопроводности алюминия. Коэффициент термического расширения для данного металла при комнатной температуре относительно мал, однако с повышением температуры он заметно увеличивается.

Модуль Юнга титана не большой и показывают существенную анизотропию. При повышении температуры до 350 °С модуль упругости сокращаются по линейному закону. Небольшое значение модулей упругости титана считается значительным недостатком, поэтому для получения жестких конструкций требуется использовать наибольшие сечения изделий в сравнении с теми, что следуют из условий прочности. ¶Титан имеет высокое удельное электросопротивление, которое в зависимости от примесей колеблется в пределах от $42 \cdot 10^{-8}$ до $80 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Он становится сверхпроводником при температурах ниже 0,45 К.

Титан является парамагнитным металлом. А, как известно, у парамагнитных металлов, магнитная восприимчивость, как правило, снижается при нагревании. Однако титан является исключением из этого правила - его восприимчивость существенно увеличивается с ростом температур.

Основными достоинствами титана являются:

- При повышенных температурах до 250-500 °С сплавы из титана обладают высокой механической прочностью и способны превосходить даже самые прочные алюминиевые сплавы;
- Удельная прочность (отношение прочности и плотности) сплавов из титана доходит до 30-35 и более, что почти в 2 раза превышает удельную прочность легированных сталей;
- Небольшой расход применяемого материала связанный малой плотностью (4500 кг/м^3) способствующей сокращению объема;

- Еще одним из главных преимуществ титана перед другими металлами является его высокая коррозионная стойкость, которая обусловлена возможностью титана формировать на своей поверхности тонкие (5-15 мкм) сплошные оксидные пленки, твердо сопряженные с объемом металла.

Одними из важных недостатков титана являются:

- Большая сложность изготовления титана влечет за собой высокую цену, которая является гораздо выше, нежели у алюминия, железа, магния, меди;
- Значительным недостатком титана является его повышенная реакционная способность при высоких температурах, с газами входящими в атмосферу, что способны создавать тугоплавкие соединения на поверхности металла. Следовательно, титан и его сплавы плавят исключительно в вакууме или в среде с инертными газами;
- Отходы, остающиеся после получения титана невозможно использовать в производстве;
- Титан имеет плохие антифрикционные свойства, из-за которых происходит налипание титана на большое количество других материалов, следовательно, титан в паре с титаном не может работать на трение;
- Также титан, как и многие его сплавы, склонен к солевой коррозии и водородной хрупкости;
- Неудовлетворительная обрабатываемость резанием, схожая по обрабатываемости с нержавеющей сталью аустенитного класса;
- Еще одним из главных недостатков является значительная химическая активность, склонность к увеличению зерна и фазовым изменениям при высокой температуре приводят к проблемам во время сварки титана.

Главными сферами применения титана являются в авиационная промышленность, ракетостроительная отрасль и морское судостроение. Титан (ферро-титан) также применяют как легирующую добавку к сталям высокого качества, а также как раскислитель. Неочищенный титан используется при изготовлении трубопроводов, арматуры, емкостей для химических реакторов, насосов, клапанов и других изделий, которые работают в агрессивных средах. Из компактного титана можно выполнить сетки и различные детали электровакуумных приборов, работающих при высоких температурах.

Титан является четвертым по использованию конструкционным материалом, после алюминия, железа и магния. Аллюминида титана являются жаропрочными и способны удерживать окисление. Благодаря этим свойствам они получили широкое применение в автомобилестроении и авиации как одни из лучших конструкционных материалов.

В последние годы титан стал очень востребован и нашел большое применение в восстановительной хирургии, стоматологии и пищевой промышленности, так как он является биологически безвредным материалом и не отторгается живым организмом.

Также титан и его сплавы обширно используют в технической промышленности, так как они обладают значительной механической прочностью, даже при эксплуатации в высоких температурах, а также рядом других характеристик, таких как коррозионная стойкость, удельная прочность, жаропрочность, малая плотность и других отличительных свойств. Высокую цену на титан и его сплавы возмещает их хорошие эксплуатационные свойства, а иногда данный материал является единственным пригодным для изготовления конструкции или оборудования, способного работать в данных условиях.

Сплавы из титана незаменимы в авиационной технике, для получения легких конструкций с высокой прочностью. Он легче, чем другие металлы, и способен работать при высоких температурах. Титановые сплавы часто

применяют для изготовления деталей крепления, обшивки, деталей шасси, силовых наборов, различных агрегатов. В некоторых случаях данные сплавы используются при конструировании авиационных реактивных двигателей, что приводит к снижению массы на 10-25 %. Также на основе титановых сплавов производятся лопадки компрессора, диски, крепеж, детали воздухозаборника и направляющего аппарата.

Ещё одной областью применения титана является ракетостроение. Главные проблемы в данной отрасли это усталостная прочность, статическая выносливость и частично ползучесть, из-за быстрого прохождения плотных слоев атмосферы и кратковременной работы двигателей.

Технический титан нельзя применять в авиации, так как он недостаточно высокой теплостойкий, однако обладает хорошими антикоррозионными свойствами. Это свойство является незаменимым в судостроении и химической промышленности. Такой титан применяют при конструировании насосов и компрессоров запорной арматуры, фильтров, трубопроводов, автоклав также различного рода емкостей для перекачки и транспортировки агрессивных сред, таких как соляная и серная кислота и солей на их основе. Титан это единственный в своем роде металл, который обладает высокой коррозионной стойкостью в таких средах, например как влажный хлор, его кислые и водные растворы, благодаря данной особенности он нашел большое распространение в хлорной промышленности. Титан применяется в производстве теплообменников, которые способны работать в коррозионно активных средах, например азотная кислота. В судостроительной промышленности титан применяют для производства обшивки морских судов, гребных винтов, торпед, подводных лодок и т.д. К титану и его сплавам не могут налипать ракушки, которые увеличивают сопротивление судна во время движения.

Из-за высокой своей стоимости и дефицитности титан ограничивают в использовании во многих видах техники.

Соединения с титаном получили широкое применение в различных отраслях промышленности, к примеру, карбид титана используют в производстве абразивных материалов и режущих инструментов благодаря своей высокой твердости. Белый диоксид титана (TiO_2) используют в создании красок, бумаги и пластика. Титанорганические соединения зачастую используются как отвердитель и катализатор в лакокрасочной промышленности и химической. Титановые неорганические соединения находят свое применение как химические добавки в стекловолоконной и электронной промышленности. Диборид титана служит незаменимым соединением сверхтвердых материалов для обработки металлов. Нитридом титана является покрытием для различных инструментов.

Главными преимуществами титановых сплавов среди других конструкционных материалов служат их высокие жаропрочность, удельная прочность и коррозионная стойкость. Помимо этого, титан и его сплавы хорошо свариваемы, парамагнитны и обладают также другими свойствами, имеющими большое значение в ряду отраслей по производству техники. Вышесказанные особенности данных сплавов открывают большие перспективы их применения в областях машиностроения, в которых требуются высокая удельная жаропрочность, прочность и высокую коррозионную стойкость.

Титановые сплавы можно разделить на три группы:

- Высокопрочные и конструкционные титановые сплавы – это твердые растворы, что обеспечивает оптимальное соотношение характеристик пластичности и прочности.
- Жаропрочные титановые сплавы – это твердые растворы с большим или меньшим количеством химического соединения, что обеспечивает повышенную жаропрочность при минимальном снижении пластичности. Титановые сплавы на основе химического соединения - интересны как жаропрочные материалы с низкой плотностью, способны конкурировать с никелиевыми

жаропрочными сплавами в определенном температурном интервале. Титан – это один из важнейших конструкционных металлических материалов.

- Металлургическая промышленность поставляет полуфабрикаты технического титана марок ВТ1 - 00 и ВТ1 - 0 отличающихся содержанием примесей. Это материалы малой прочности, причем титан ВТ1 - 00, содержащий меньше примесей, отличается большей пластичностью и меньшей прочностью. Основное достоинство технического титана - высокая технологическая пластичность, что позволяет получать из него даже фольгу

Прочностные свойства титана могут быть повышены нагартовкой, но при этом сильно снижаются пластические свойства. Снижение характеристик пластичности выражено сильнее, чем повышение характеристик прочности, так что нагартовка не самый лучший способ улучшения комплекса свойств титана. К недостаткам титана следует отнести высокую склонность к водородной хрупкости, в связи с чем содержание водорода не должно превышать 0,008 % в титане ВТ1 - 00 и 0,01 % в ВТ1 – 0.

1.2 Механизм деформации путем двойникования

Кроме деформации скольжением, титан деформируется также двойникованием. Как и в случае скольжения, двойникование в титане по определенным плоскостям, количество которых превышает количество плоскостей двойникования других гексагональных металлов, за исключением циркония. При первых исследованиях монокристаллов титана было выявлено существование пяти плоскостей двойникования $\{10\bar{1}2\}$, $\{11\bar{2}4\}$, $\{11\bar{2}3\}$ и $\{11\bar{2}2\}$ это больше нежели в поликристаллическом крупнозернистом титане в котором изначально были обнаружены только три плоскости $\{10\bar{1}2\}$, $\{11\bar{2}1\}$ и $\{11\bar{2}2\}$, это может сыграть большую роль в процессе деформации.

Существование таких плоскостей двойникования подтвердилось другими исследованиями, благодаря которым объясняется механизм двойникования. Был проведен эксперимент в котором производилась нагрузка монокристалла из иодидного титана расположенного перпендикулярно оси **C** и находящегося в интервале температур 400-800°C при котором была открыта новая плоскость двойникования $\{10\bar{1}1\}$.

Как и линии скольжения, двойники способны иметь различную ширину. Если двойники имеют достаточную ширину то их можно отличить от линий скольжения при помощи поляризованного света.

Рост двойников при понижении температуры можно увидеть на ударных образцах, с видимыми заострениями образуются в зоне деформации.

Образование двойников приводит к удлинению кристалла в одном из направлений и укорочению в другом, это приводит к тому что образование двойников в зависимости от направления нагрузки может протекать незаметно или вообще не начаться. В плоскости $\{10\bar{1}2\}$ двойникование осуществляется только в том случае, когда угол между осью **C** и направлением нагрузки больше 45° ($c < a\sqrt{3}$). Следовательно, при наличии выраженной текстуры прокатки данная плоскость двойникования неспособна участвовать в процессе деформации. Однако ситуация с плоскостями $\{11\bar{2}1\}$ и $\{11\bar{2}2\}$ обстоит иначе. Критическое отношение осей для первой плоскости составляет $c = a/2$, а для второй $a = c$. В ситуации с титаном $c > a/2$ и $c > a$. Отсюда следует, что если угол между осью **C** и направлением нагрузки находится в пределах от 0 до 44° , то произойдет сокращение кристалла, это значит, что обе плоскости двойникования при наличии выраженной текстуры прокатки способны внести вклад в деформацию при прокатке. Исходя из этого следует, что при перпендикулярном расположении направления нагрузки и базисной плоскости двойников образуется больше, а при параллельном меньше. Критическое напряжение, которое необходимо для начала двойникования,

является наименьшим для пирамидальной плоскости первого порядка $\{10\bar{1}2\}$, так как во всех случаях, в том числе и при температурах до 800 °С, данная плоскость чаще вступает в действие, чем пирамидальные плоскости второго порядка $\{11\bar{2}1\}$, $\{10\bar{1}2\}$, $\{11\bar{2}3\}$ и $\{11\bar{2}4\}$. Напряжение, которое необходимо для образования двойников в плоскостях второго порядка, должно расти от плоскости $\{11\bar{2}2\}$ к плоскостям $\{11\bar{2}4\}$ и $\{11\bar{2}3\}$ следовательно уменьшается межатомные расстояния и происходит уменьшение атомной плотности. В плоскости $\{11\bar{2}2\}$ был измерен рост критического напряжения в зависимости от температуры на монокристаллах из иодидного титана содержащие 0,02 % кислорода. Начиная с температуры 400 °С плоскость $\{11\bar{2}2\}$ сменяется плоскостью $\{10\bar{1}1\}$. На похожих образцах было установлено, что для плоскости двойникового $\{11\bar{2}1\}$ критическое напряжение при температуре -196°С ниже, нежели при комнатной температуре.

Теоретические выкладки показывают, что процессы двойникового и скольжения могут быть взаимообусловлены. Например, $\{11\bar{2}2\}$ – двойникование мешает процессу скольжения под действием нагрузки. Соотношение критических напряжений для двойникового (τ_z) и скольжения (τ_G) такого: $\tau_G\{0001\}=1,1\tau_G\{10\bar{1}1\} = 1,02\tau_G\{10\bar{1}0\} = \tau_z\{10\bar{1}2\} = \tau_z\{11\bar{2}2\}$. Критические напряжения для двойникового в плоскостях $\{10\bar{1}2\}$ и $\{11\bar{2}2\}$ должны быть одинаковыми. Процессы распространения двойников в различных направлениях кристалла способны влиять друг на друга. Как пример, уже существующий $\{10\bar{1}2\}$ – двойник способен препятствовать росту внедряющегося в него двойника той же плоскости. Образование $\{10\bar{1}2\}$ – и $\{11\bar{2}1\}$ – двойников влияющих друг на друга так, что дополнительно возникающий двойник может отклониться от своего начального направления роста ранее образовавшимся двойником. Очевидно что степень отклонения при этом зависит, от ширины первоначального двойника. При узких двойниках направление меняется несущественно.

Искажение структуры в плоскостях скольжения, способно облегчить образование двойников. Дефекты упаковки базисной плоскости после деформации β -титана часто можно обнаруживать внутри $\{10\bar{1}2\}$ – двойников.

При изменении знака нагрузки, что можно достигнуть путемгиба с перегибом, образовавшийся двойник может исчезнуть.

Двойникование способно усиливается с повышением степени деформации, чистоты металла, величины зерна и с понижением температуры. Так при температуре -196°C в отличие от комнатной у крупнозернистого титана имеются две плоскости двоникования, тогда как при 500°C обнаруживается только одна плоскость двойникования $\{10\bar{1}2\}$. При 700°C образование двойников почти не наблюдается, а при температуре около 800°C вступают в действие плоскости двойникования $\{10\bar{1}2\}$, $\{11\bar{2}1\}$ и $\{11\bar{2}2\}$.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Техника безопасности и охрана труда

Одной из важных частей производственной деятельности является обеспечение безопасности труда сотрудника. Этому всегда уделяют особое внимание перед началом работы на оборудовании.

В научно-исследовательской лаборатории НИУ БелГУ ответственный за охрану труда руководитель лаборатории. Однако мероприятиями по технике безопасности занимается его заместитель. При принятии на работу для всех сотрудников проводится инструктаж по охране труда, а также организовывается обучение безопасным методам выполнения работ и оказания первой медицинской помощи пострадавшим. ГОСТ 12.0.004-90 является главным нормативно-правовым актом по проведению инструктажа по безопасности труда.

Следовательно, охрана труда и техника безопасности представляет собой комплекс мероприятий, которые направлены на обеспечение безопасности здоровья работников во время выполнения своих обязанностей, при работе с оборудованием.

Правила работы на оборудовании для студентов:

- Работать с химическими реактивами в лаборатории необходимо в халате, перчатках и защитных очках. Это защитит одежду и кожу от попадания на них реактивов.
- Рабочее место следует поддерживать в чистоте, не загромождать его посудой и прочими вещами.
- Запрещается работать в лаборатории самостоятельно без присутствия преподавателя или лаборанта.
- Запрещается работать в неустановленное время без разрешения преподавателя.

- При неисправности в работе электроприбора необходимо обратиться к преподавателю.
- Чинить самостоятельно приборы запрещается.

2.2 Метод акустической эмиссии

Акустическая эмиссия (далее по тексту - АЭ) - это процесс излучения распространяющихся в материале волн возмущений, вызванных динамической локальной перестройкой структуры материалов под действием внутренних напряжений, приводящих к изменению кристаллической решетки или движению микро- и макродефектов. Характеристики сигналов АЭ, сопряженных с локальными перестройками структуры материалов, коррелируют с параметрами кинетики формирования дефектов и разрушения материала. Одним из источников деформационных сигналов являются процессы движения дислокаций, сигналы АЭ которых коррелируют с дискретным механизмом пластической деформации и скачками на диаграмме упрочнения. С помощью сигналов сопровождающих процессы деформации достаточно надежно обнаруживаются фазовые превращения в материалах. Регистрация таких сигналов является одним из методов исследования процессов образования и развития трещин.

Результатами физических исследований акустических волн, связанных с деформированием материалов, являются явления, которые создают эффективные методы неразрушающего диагностического контроля состояния материалов для того, чтобы оценить опасность возникновения ситуаций и близости момента отказа конструкционных элементов. Аналогичные предпосылки уже нашли определенную реализацию в аппаратуре и способах диагностики материалов конструкций. В настоящее время ведется внушительная деятельность в области использования акустической эмиссии для неразрушающей диагностики конструкционных машиностроительных материалов.

Разработанные методы диагностического контроля и необходимая для этих целей аппаратура дают обширный потенциал для неразрушающей диагностики сосудов давления, сварных и клеевых соединений, обнаружения усталостных трещин, модификации структуры материалов. Результаты экспериментов опубликованных в литературе демонстрируют, что при использовании метода акустической эмиссии, возможно, определить уровень напряжений материала конструкции, обнаруживать развивающиеся дефекты и измерять их координаты, производить оценку степени опасности дефектов, а также решать другие задачи при оценке состояния конструкций и сооружений. Но данные способы никак не отыскивали сейчас обширного фактического использования. Это можно объяснить, тем, что из-за относительной новизны, а также ряда нерешенных задач теории и практики и отсутствием систематизированного материала, которым может воспользоваться специалист, о сущности и возможностях методов, их достоинствах и недостатках, рациональных областях применения.

Наиболее важные особенности метода АЭ, определяющие перспективность его использования при исследовании и контроле материалов и конструкций:

1. Возможность обнаружения и регистрации только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности.
2. Чувствительность метода АЭ значительно превышает чувствительность традиционных методов неразрушающего контроля, метод позволяет выявлять приращение трещины на 0,025мм.
3. Метод является интегральным. В случае необходимости определения места нахождения дефекта, возможно использовать два или более преобразователей.

4. Метод позволяет проводить непрерывный контроль работающих объектов с целью их остановки в случае появления и развития опасных дефектов.
5. Положение и ориентация дефектов не влияют на их обнаружение.
6. Метод имеет значительно меньше ограничений, связанных со структурой и физико-механическими свойствами материалов, чем другие методы неразрушаемого контроля.

Для регистрации АЭ использовали прибор «Малахит АС – 15А», характеризующийся высокой производительностью с интерфейсом USB2,0 и работающий с компьютером в любом исполнении. Для регистрации АЭ образец соединялся с пьезоэлектрическим датчиком установки «АС – 15А» с последующей установкой его на предметном столике ультразвукометра. Примененная схема эксперимента позволяет одновременно регистрировать глубину проникновения алмазной пирамидки и максимальную энергию E_{\max} сигналов АЭ, время погружения при одном и том же значении приложенной нагрузки на индентор при комнатной температуре.

2.3 Определение модуля упругости

Модуль упругости —это обобщенное название нескольких физических величин, основной характеристикой которых является способность материала упруго деформироваться при приложении к нему нагрузки. Одной из более распространенных является линейная зависимость напряжения от деформации, которая соответствует закону Гука. В области упругих деформаций модуль упругости зависит от напряжения и определяется градиентом зависимости напряжения от деформации, что соответствует тангенсу угла наклона линейной области диаграммы напряжений-деформаций:

$$E \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1)$$

где E — модуль упругости; σ — напряжение, вызываемое в образце действующей силой, которое равно силе, делённой на площадь приложения силы; ε — упругая деформация образца, вызванная напряжением, которая равна изменению размера образца после деформации деленного на его первоначальный размер.

В системе СИ единицей измерения модуля упругости является паскаль поскольку напряжение измеряется в паскалях, а деформация является безразмерной величиной. Существует еще одно определение модуля упругости:

Модуль упругости — это напряжение, которого достаточно для увеличения длины образца в два раза. Однако данное определение является не точным для большинства материалов, потому как это значение значительно превышает предел текучести материала или значения, при котором удлинение не подчиняется закону Гука, оно может оказаться более точным.

Существует большое количество способов, которыми можно измерить напряжение и деформацию, включая различные направления действующих сил, это позволяет определить большое количество типов модулей упругости. Рассмотрим три основных:

- *Модуль Юнга (E)* выражает способность материала к сопротивлению при растяжении или сжатии в области упругих деформаций, или это свойство объекта деформироваться вдоль оси при воздействии силы вдоль данной оси. Модуль Юнга определяется отношением напряжения к деформации удлинения или сжатия. Его зачастую называют модулем упругости.
- *Модуль сдвига или модуль жесткости (G)* выражает способность материала к сопротивлению изменения формы при сохранении объёма. Модуль сдвига находится отношением напряжения сдвига к

его деформации, которая определяется изменением прямого угла между двух плоскостей, по которым действуют касательные напряжения. Модуль жесткости — это один из составляющих явления вязкости.

- *Модуль объёмной упругости или Модуль объёмного сжатия (К)* выражает способность материала изменять объём под действием всестороннего нормального напряжения, которое одинаково по всем направлениям. Примером такого напряжения является гидростатическое давление. Модуль объёмного сжатия равен отношению объёмного напряжения к относительному объёмному сжатию. В отличие от модуля сдвига и модуля, модуль объёмного сжатия невязкой жидкости не равен нулю.

Также есть и другие модули упругости такие как параметры Ламе и коэффициент Пуассона.

Гомогенные и изотропные твердые материалы, обладающие линейными упругими свойствами, полностью описываются парой любых модулей упругости. Если известно хотя бы два модуля упругости, то остальные модули могут быть получены благодаря формулам.

В случаях невязких течений сдвиговый модуль равен нулю, так как в них не существует сдвигового напряжения. Это приводит к тому, что модуль Юнга равен нулю.

2.4 Методика работы на оптическом микроскопе

Оптический микроскоп — оптический прибор для получения увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, невидимых невооружённым глазом. Оптическая система микроскопа состоит из основных элементов - объектива и окуляра. Они закреплены в подвижном тубусе, расположенном на металлическом основании, на котором имеется

предметный столик. В данном микроскопе так же есть осветительная система, макро- и микро - винты для настройки резкости [6].

Объектив микроскопа представляет собой сложную оптическую систему, образующую увеличенное изображение объекта, и является основной и наиболее ответственной частью микроскопа. Объектив создает изображение, которое рассматривается через окуляр. Поскольку окуляры могут давать существенное увеличение, то и оптические искажения, вносимые объективом, также будут увеличены окуляром. С помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX71 и программы Analy SIS Start были проведены исследования поверхности образцов и оценка пористости. Исследования проводились при следующих увеличениях: $\times 5$, $\times 10$ и $\times 20$.

2.5 EBSD анализ

Наиболее информативный метод исследования поверхности материалов — это просвечивающая электронная микроскопия тонких фольг. С момента появления этой очень сложной методики удалось получить качественные и количественные оценки распределения дефектов кристаллических материалов, что позволило сопоставить изменения структуры материалов с технологическими параметрами их получения. В последние годы также успешно использовалась методика построения карт зеренных ориентировок путем анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (методика EBSD - Electron Backscatter Diffraction). Высокое разрешение, микротекстура, разориентировка границ и анализ изображений были добавлены к обычно используемым представлениям о размере и визуальном отображении для описания структуры. Основной задачей этих работ было определить характеристики структуры, которые могут объяснить высокую прочность и вязкость сплавов.

Картины микродифракции обратнорассеянных электронов содержат информацию об ориентации кристаллов, помогают в идентификации фаз с

разной кристаллической структурой, а также способны давать информацию о локальных механических напряжениях. Все современные области применения этого метода связаны с использованием выше упомянутой информации. В комбинации с другими возможностями сканирующего электронного микроскопа это дает уникальную информацию об исследуемом образце. Картины микродифракции обратнорассеянных электронов формируются тогда, когда пучок электронов микроскопа падает на расположенную под углом 70° поверхность исследуемого образца. Визуально наблюдаемая дифракционная картина формируется на помещенном в камеру микроскопа люминесцентном экране, она проявляется в виде тонких полос, называемых линиями Кикучи. Каждая из этих линий соответствует определенной кристаллической плоскости hkl , а точки пересечения этих линий – зонам плоскостей. Результирующие картины EBSD состоят из множества линий Кикучи.

С помощью специальных компьютерных программ автоматически определяется положение каждой из линий, производится сравнение с теоретическими данными о соответствующей кристаллической фазе и быстро вычисляется трехмерная кристаллографическая ориентация. Обработка и анализ картин микродифракции в реальном времени осуществляется с помощью специальной программы, полностью совместимой с графическим интерфейсом микроаналитической системы, позволяющей извлечь кристаллографическую информацию из первичных снимков и обработать ее количественно. С ее помощью можно, в частности, получать диаграммы и карты ориентации кристаллов поликристаллических материалов, где ориентация определенных кристаллографических направлений кодируется цветом, получать гистограммы размера кристаллических зерен, строить полюсные фигуры и др.

2.6 Методика измерения твердости с помощью динамического микротвердомера

Микротвердомер – это прибор, используемый в лабораторных металлографических исследованиях. Данное оборудование представляет собой микроскоп, определяющий микротвердость различных объектов, вдавливая в них алмазный наконечник. Микротвердомеры активно используются для выявления микротвердости сплавов, металлов, керамики и ряда других материалов [8].

Существует несколько разновидностей микротвердомеров, классифицируемых по используемому методу определения твердости объектов. Наиболее популярный на сегодняшний день – метод Виккерса. Сущность метода заключается во вдавливании в испытуемый материал правильной четырёхгранной алмазной пирамиды с углом 136° между противоположными гранями с определенным усилием (выбираемом в зависимости от исследуемого материала). После снятия нагрузки измеряется длина диагоналей отпечатка. Метод Виккерса позволяет определять твёрдость азотированных и цементированных поверхностей, а также тонких листовых материалов. Наблюдается хорошее совпадение значений твёрдости по Виккерсу и Бринеллю в пределах от 100 до 450 HV. Основными параметрами при измерении твёрдости по Виккерсу являются нагрузка P до 980,7 Н (100 кгс) и время выдержки 10—15 с.

В соответствии с ГОСТ 2999-75 [9], твердость по Виккерсу при условиях испытания $F=294,2$ Н (30 кгс) и времени выдержки под нагрузкой 10-15 с - обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HV. При других условиях испытания после букв HV указывается нагрузка и время выдержки [10].

Испытание проводилось с помощью акустико-эмиссионной системы МАЛАХИТ АС-15А, схема которого представлена на рисунке 1.

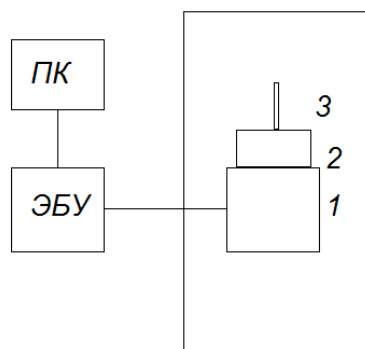


Рис. 2.1 Схема акустико-эмиссионной системы МАЛАХИТ АС-15А

На данной схеме представлено:

1. Подложка
2. Образец
3. Индентор

Основным недостатком метода является зависимость измеряемой твёрдости от приложенной нагрузки или глубины внедрения индентора. Особенно сильно эта зависимость проявляется при малых нагрузках.

2.7 Подготовка образцов

Для проведения эксперимента в качестве материала был выбран титан полученный с помощью вакуумно-дугового плавления(ВДП) из титановой губки марки ТГ-130(химический состав представлен в таблице 1)

Таблица 2.1

Химический состав

Ti, %	Fe, %	Cl, %	N, %	O, %	Si, %	Ni, %	C, %
≥99.56	0.010	0.093	0.007	0.032	0.003	0.011	0.004

Материал соответствовал спецификации по ГОСТ 17746-96[11].

В двух состояниях:

- Исходное (далее по тексту образец 1);

- Исходное + отжиг на воздухе при температуре 650 °С в течение 30 мин с последующим охлаждением на воздухе (далее по тексту образец 2).

Перед проведением испытаний проводилась подготовка поверхности титана высокой чистоты, которая включала в себя очистку от оксидной пленки и различных органических загрязнений.

Шлифовка и полировка поверхности проводилась при помощи шлифовально-полировального комплекса Struers LaboPol-1 поэтапно на шлифовальных кругах с различной зернистостью 120, 350 и 500.

Электрополировка проводилась при помощи постоянного источника питания Aktakom ATH-1237, используя электролит, состоящий из:

H_2SO_4 – 25%

HF – 15%

$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ – 60%

После чего образцы трижды промывались в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой и высушивались на открытом воздухе.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

3.1 Акустическая эмиссия

Индентирование осуществлялось при помощи ультрамикротвердомера Shimadzu DUN 211S, позволяющий достоверно имитировать реальные условия зарождения двойников под действием внешней нагрузки. В данном эксперименте прикладывалась нагрузка, равная 25, 50, 75, 100 и 125 грамм (рис. 3.1).

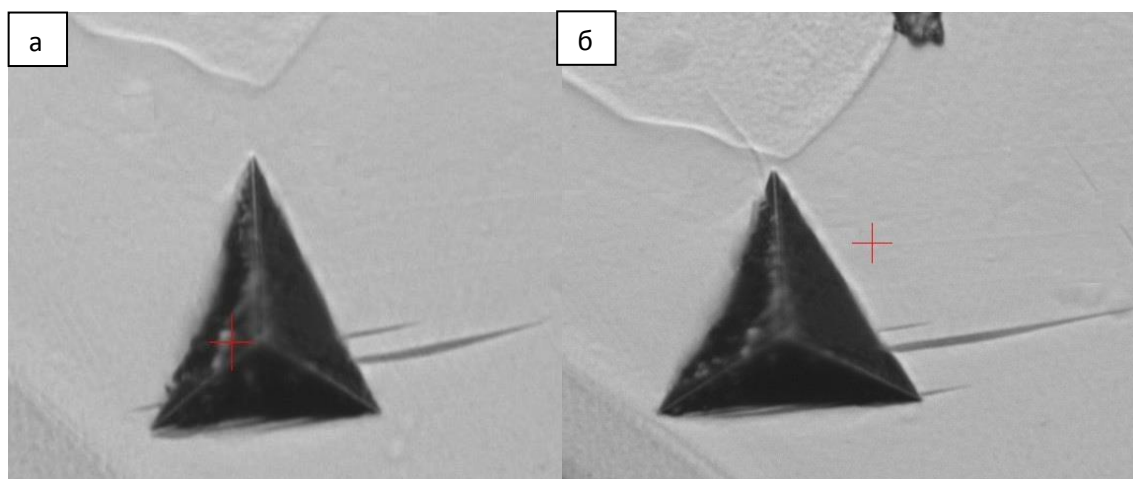


Рис. 3.1 Остаточные двойники в α -титане при индентировании с нагрузкой а) 50 грамм; б) 75 грамм

При достижении контакта кристалла с кончиком пирамидки действуют максимальные напряжения. В процессе проникновения пирамидки вглубь образца за контуром отпечатка образуется сильно неоднородно убывающее обратно пропорционально квадрату расстояния после упругих напряжений, способствующее развитию АЭ (рис.3.2).

На рисунке 3.2 можно отчетливо видеть всплеск значений акустической эмиссии при прохождении двойника через границу.

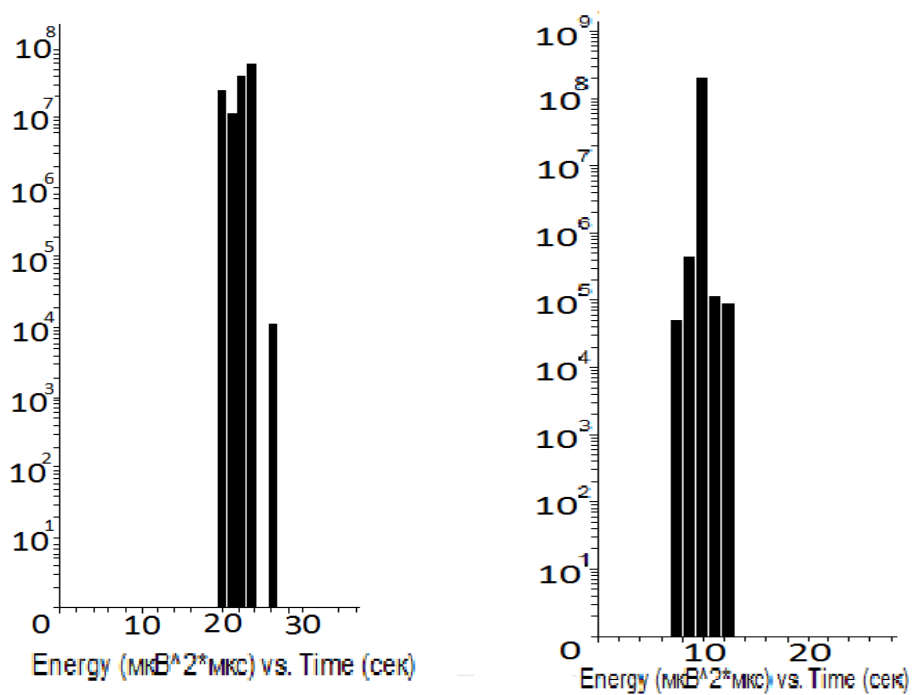


Рис. 3.2 Акустическая эмиссия в α -титане при индентировании с нагрузкой а) 50 грамм; б) 75 грамм.

Исходя из полученных данных АЭ, был построен график зависимости показаний энергии максимального сигнала от нагрузки (рис. 3.3).

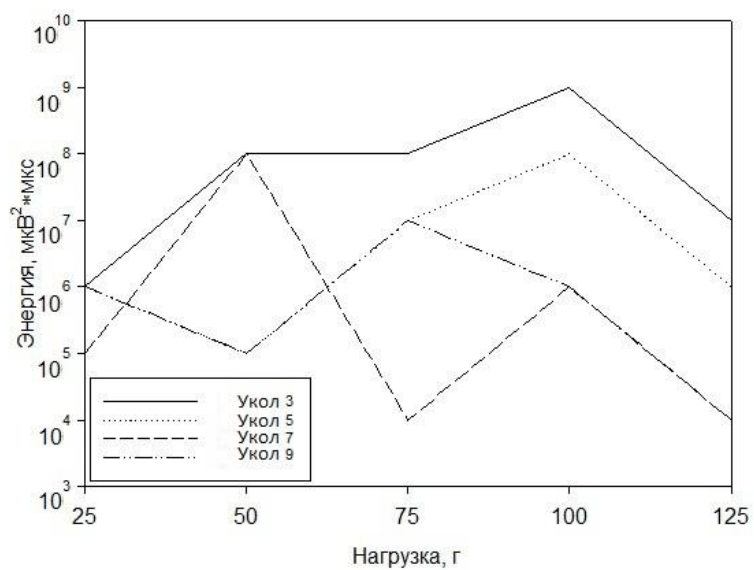


Рис. 3.3 Акустическая эмиссия.

Максимальные измеренные значения энергии акустической эмиссии, изображенные на рисунке 3.3, соответствуют случаю, когда двойник проходил через границу.

3.2 Измерения модуля Юнга и микротвердости

На рисунке 3.4 и 3.5 представлены средние значения микротвердости и модуля Юнга соответственно.

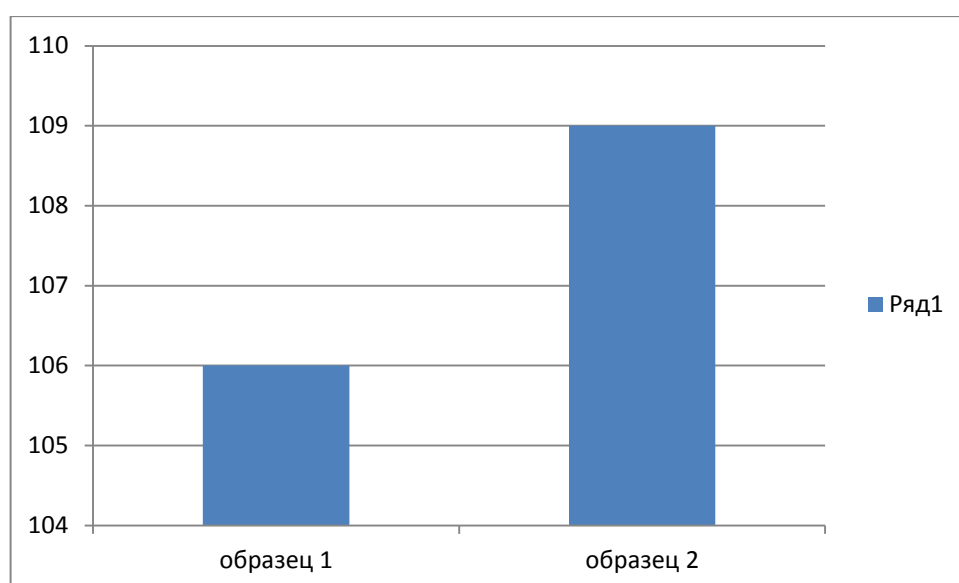


Рис. 3.4 Измерение микротвердости (HRV)

Проанализировав данные микротвердости рисунка 3.4 очевидно, что значения микротвердости отличаются незначительно, их разность соизмерима с погрешностью измерения.

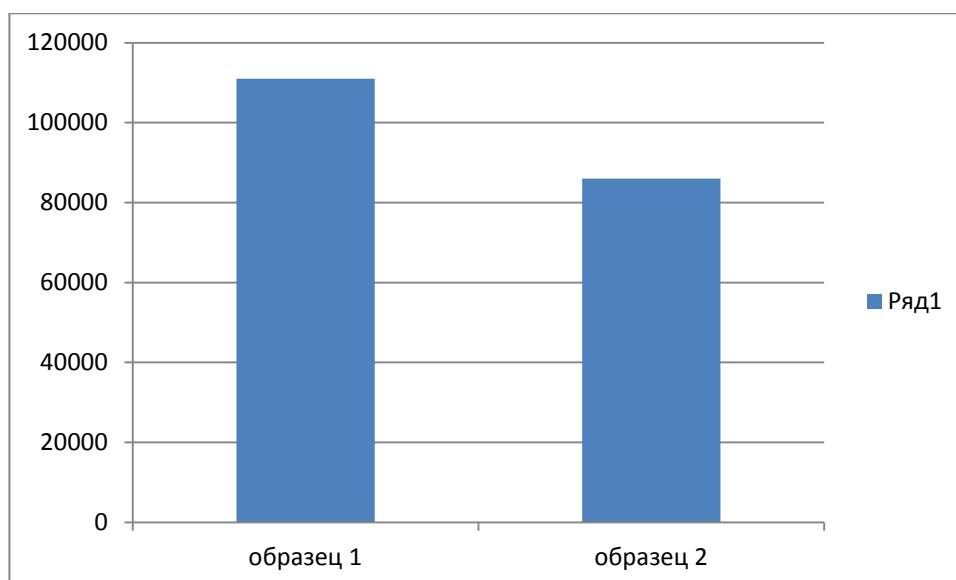


Рис. 3.5 Модуль Юнга

Исходя из полученных данных модуля Юнга можно сделать вывод, что в образцах 1 и 2 различное содержание дефектов в следствии проведенной термической обработки.

Определение разориентировок зерен и двойников в области укола осуществлялась с использованием растрового электронного микроскопа «Quanta 200 3D» при ускоряющем напряжении 30 kV, с помощью методики автоматического анализа картин дифракции, формируемых обратно рассеянными электронами – EBSD.

На не отождённом образце по причине большого количества дефектов низкий CI не позволяет провести адекватный анализ кристаллографической ориентации зерен и двойников, поэтому мы ограничились лишь фотографиями отпечатков индентора (рис. 3.6).

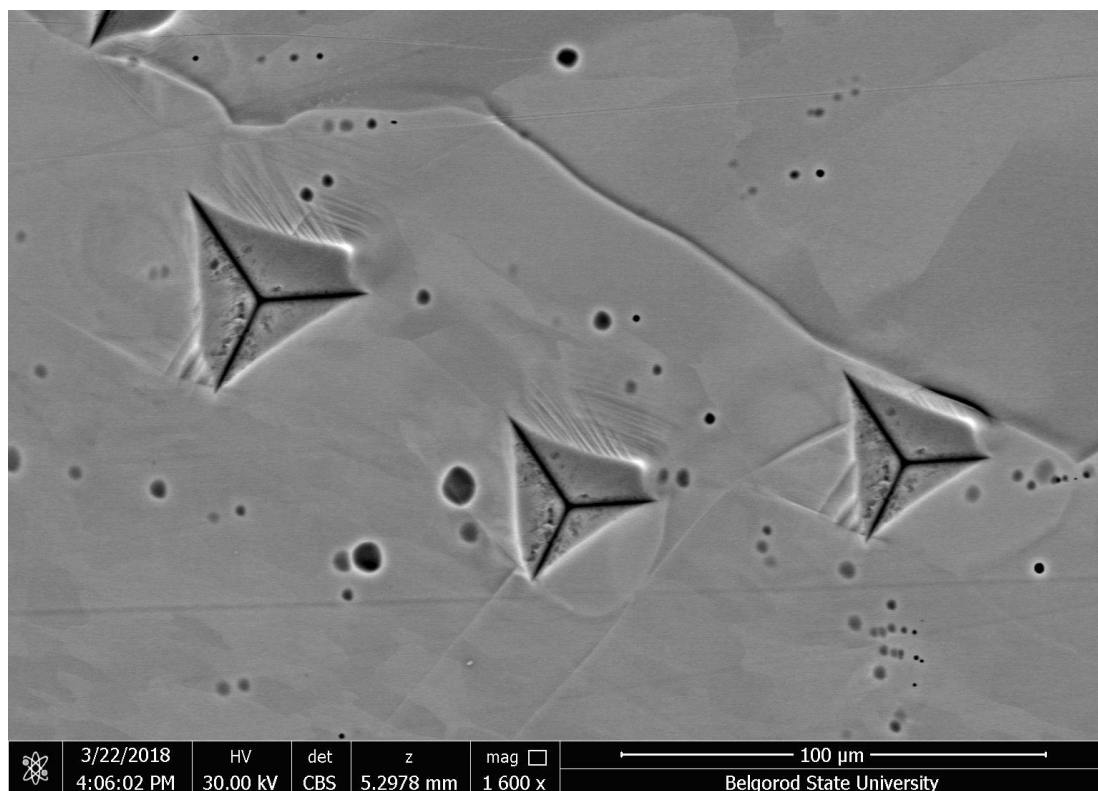


Рис. 3.6 Остаточные двойники в α -титане при индентировании

Второй образец был отожжен в печи при температуре 650°C для создания бездефектной однородной структуры.

3.3 EBSD анализ

С использованием программного обеспечения формировалась карта ориентации зерен в образце при прохождении двойника через границу (рис. 3.7).

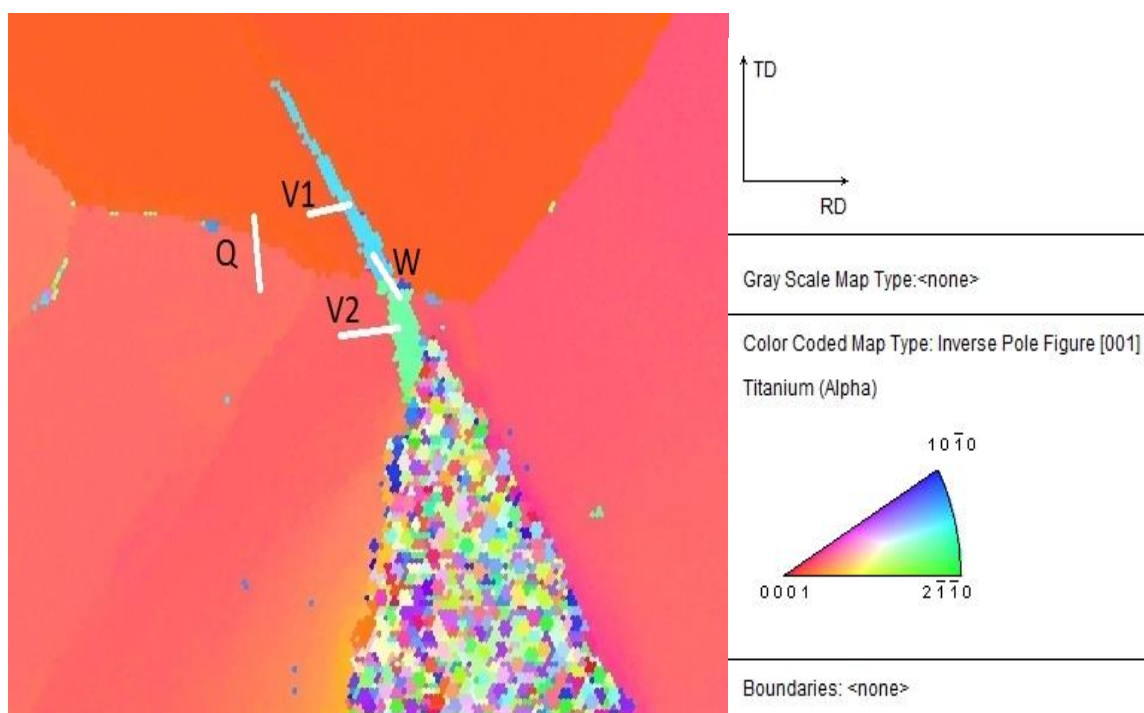


Рис. 3.7 Карта ориентации зерен в образце в области индентирования.

На рисунке 3.7 видно, что двойник зарождается в зерне на EBSD карте обозначенным розовым цветом. С увеличением нагрузки двойник продолжает свой рост и проходит в соседнее зерно на EBSD карте обозначенное красным цветом, положение данных зерен в образце представлено на рисунке 3.8. График зависимости разориентировки между точками, лежащими вдоль линии W пересекающей границу через которую проходит двойник, представлена на рисунке 3.9. Суммарная разориентировка от начальной до конечной точки приблизительно равна 25° , что примерно соответствует углу разворота двойника при прохождении границы.

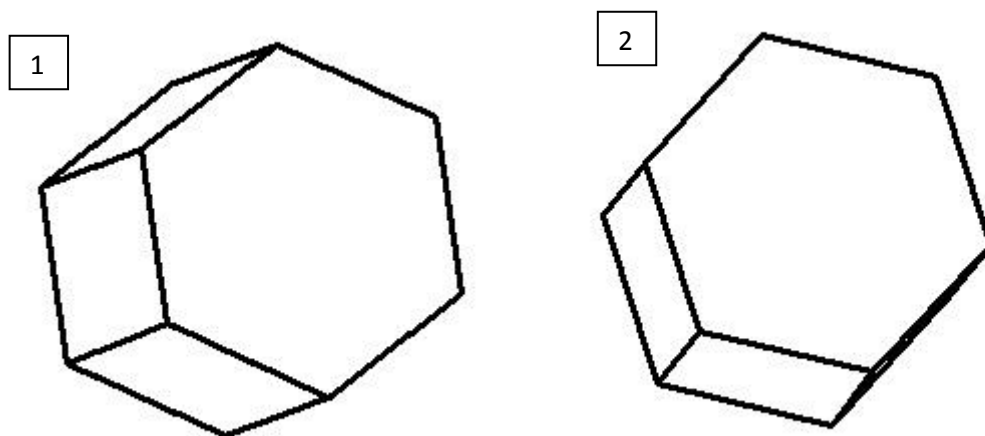


Рис. 3.8 Ориентация зерен в образце на EBSD карте, которые образуют границу через которую проходит двойник 1) зерно окрашенное розовым цветом; 2) зерно окрашенное красным цветом

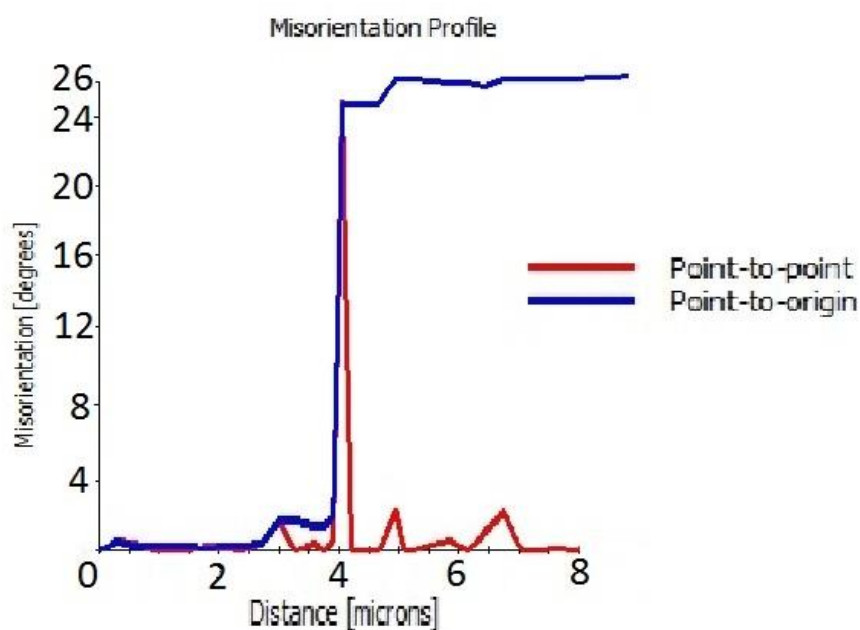


Рис. 3.9 График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии W, проходящей через двойник, до достижения им границы и после. Синяя кривая соответствует разориентировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориентировке между двумя соседними точками

График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии Q, проходящей через границу представлена на рисунке 3.10. График показывает, что угол разориентировки между двумя соседними зернами составляет в пределах 14-14,5°. Следовательно, мы можем сделать вывод, что граница является малоугловой.

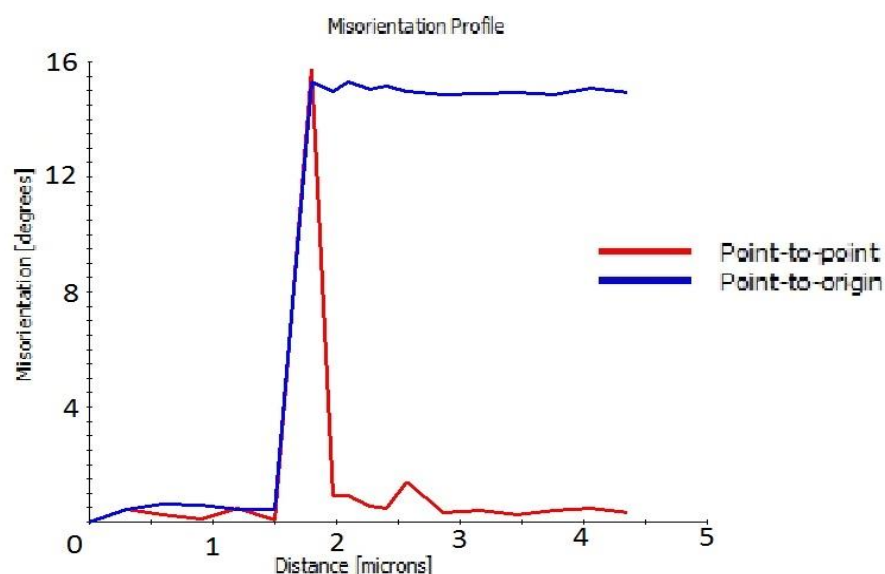


Рис. 3.10 График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии Q, проходящей через границу. Синяя кривая соответствует разориетировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориетировке между двумя соседними точками

Угол разориентировки вдоль линий V1 и V2 проходящих через зерно и двойник до пересечения им границы и после не изменился (рис. 3.11) и соответствует стандартной разориентировке между двойником и телом матрицы.

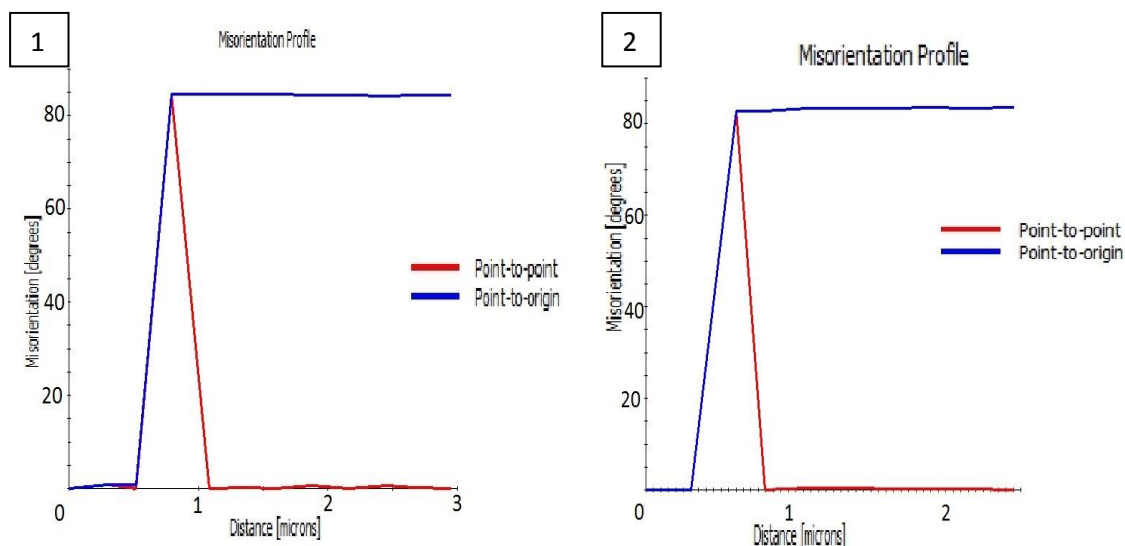


Рис. 3.11 Графики зависимости разориентации зерен между зерном и двойником лежащих вдоль линии 1) V1; 2) V2. Синяя кривая соответствует разориентировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориентировке между двумя соседними точками

Также были зафиксированы случаи, когда взаимодействие двойников с границами осуществляется по другой схеме. Один из таких случаев представлен на рисунке 3.12.

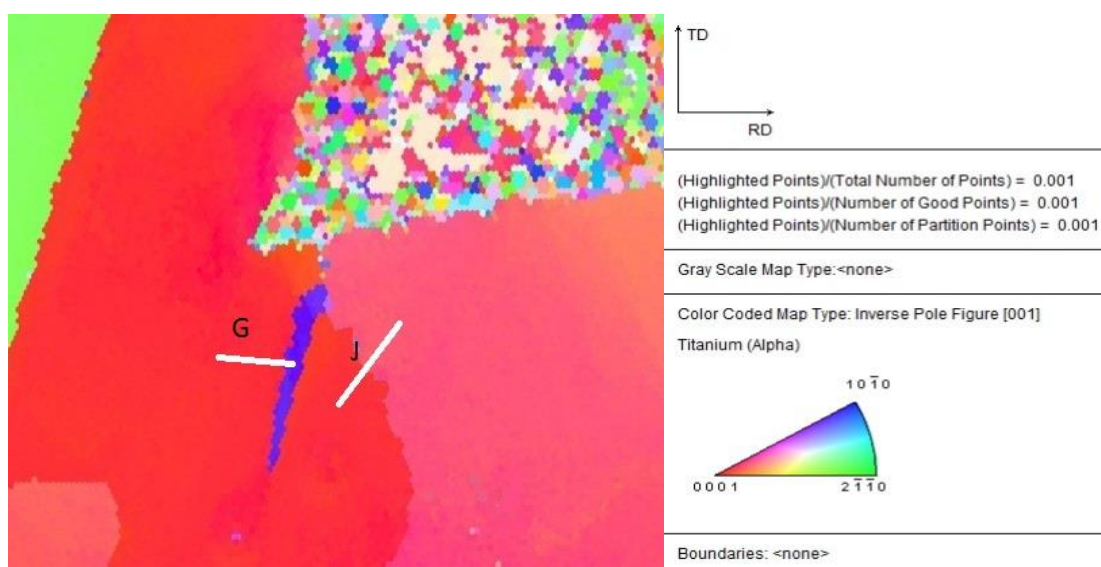


Рис. 3.12 Карта ориентации зерен в образце в области индентирования

На рисунке 3.12 видно, что двойник берет начало от границы и прорастает в зерно красного цвета. Ориентация зерен в области этого двойника представлена на рисунке 3.13.

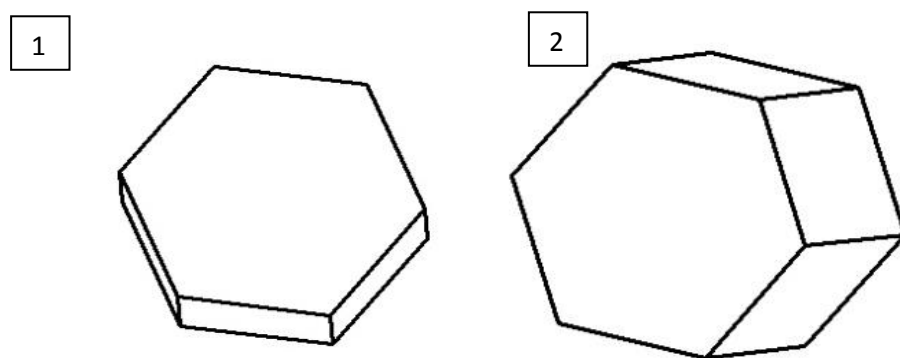


Рис. 3.13 Ориентация зерен в образце на EBSD карте 1) зерно окрашенное розовым цветом; 2) зерно окрашенное красным цветом

График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии J, проходящей через границу представлен на рисунке 3.14. Графики зависимости разориентации зерен между зерном и двойником лежащих вдоль линии G также равен 85° (рис. 3.15).

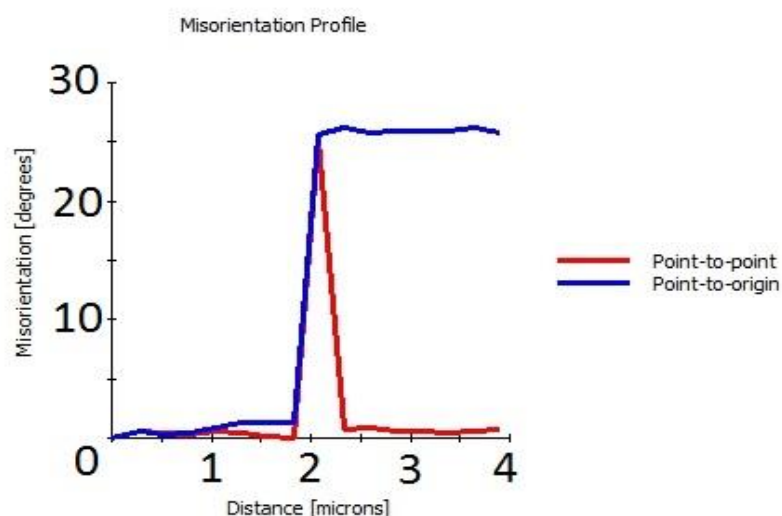


Рис. 3.14 График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии J, проходящей через границу. Синяя кривая соответствует разориетировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориетировке между двумя соседними точками

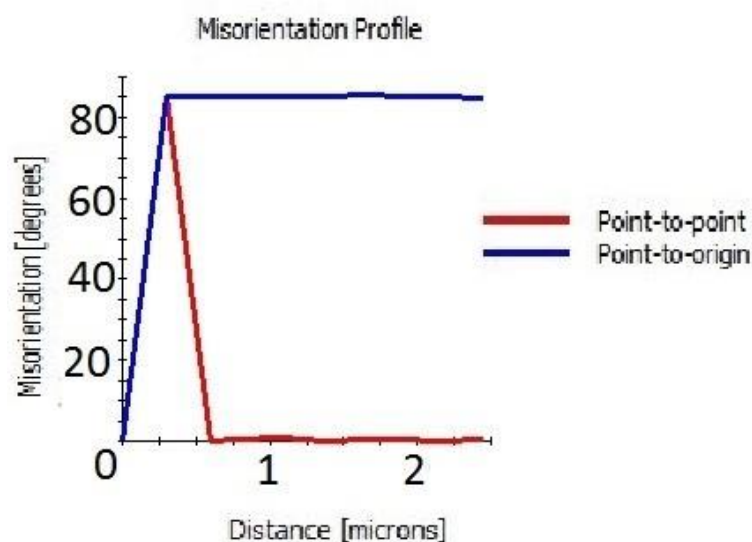


Рис. 3.15 График зависимости разориентации зерен между зерном и двойником лежащих вдоль линии G Синяя кривая соответствует разориетировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориетировке между двумя соседними точками

Еще один пример взаимодействия двойников с границами, который нам удалось зафиксировать представлен на рисунке 3.16.

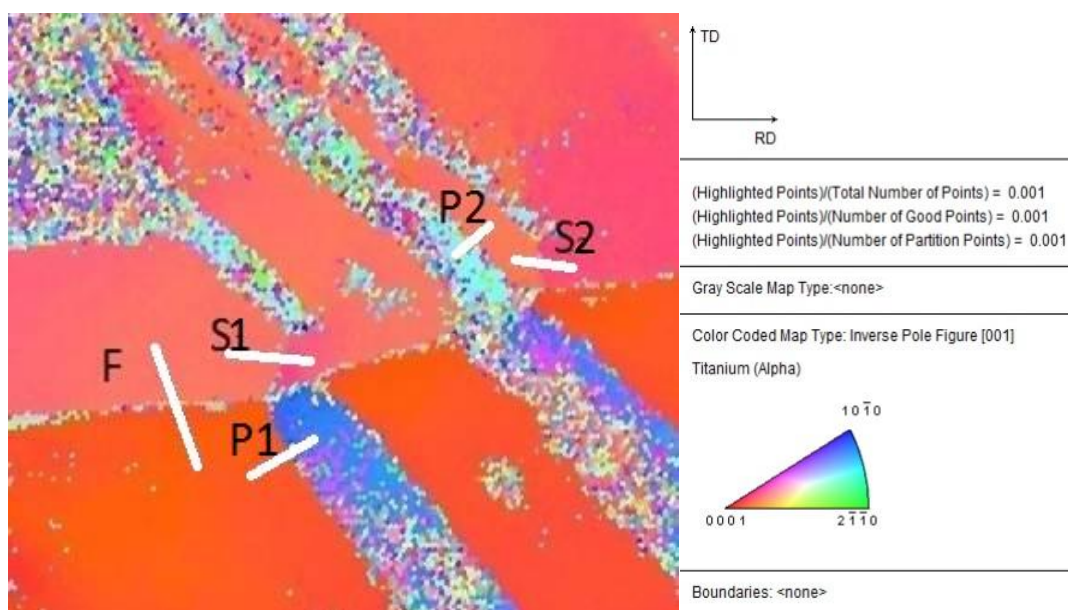


Рис. 3.16 Карта ориентации зерен в образце в области индентирования

На рисунке 3.16 видно:

- двойник берет свое начало в зерне которое на EBSD карте обозначено розовым цветом и преодолевая границу, переходит в зерно обозначенное на EBSD карте красным цветом. Ориентация зерен представлена на рисунке 3.17.

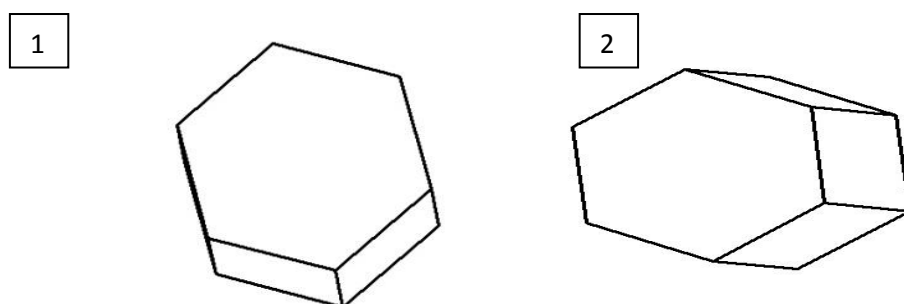


Рис. 3.17 Ориентация зерен в образце на EBSD карте 1) зерно окрашенное розовым цветом; 2) зерно окрашенное красным цветом

- двойник останавливается при достижении малоугловых границ. С увеличением нагрузки он не переходит через данные границы. Графики зависимости разориентации зерен вдоль линий S_1 и S_2 проходящих через границы лежащие 1) S_1 ; 2) S_2 представлены на рисунке 3.18.1 и 3.18.2 соответственно;

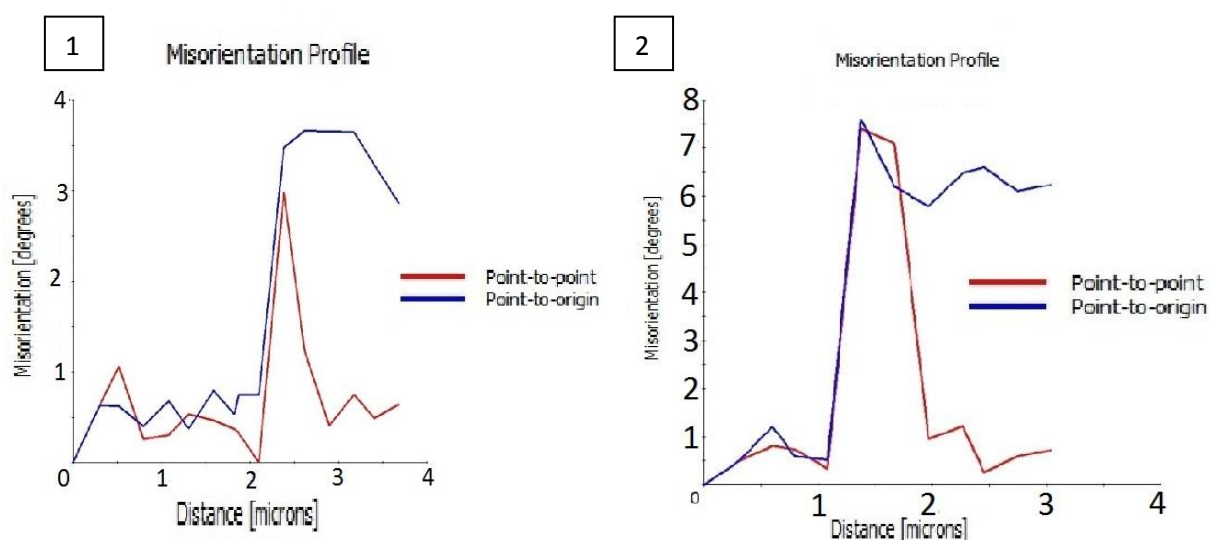


Рис. 3.18 Графики зависимости разориентации зерен проходящих через границы лежащие вдоль линий 1) S_1 ; 2) S_2 . Синяя кривая соответствует разориентировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориентировке между двумя соседними точками

- наблюдается образование и рост механического двойника, который при прохождении через границу, после разделяется на два параллельно идущих двойника. График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии F , проходящей через границу представлен на рисунке 3.19.

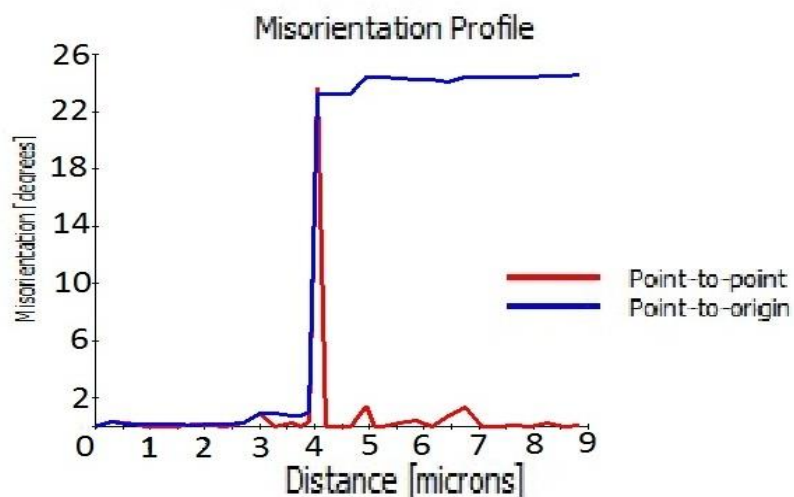


Рис. 19. График зависимости разориентации зерен лежащих вдоль линии F, проходящей через границу. Синяя кривая соответствует разориетировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориетировке между двумя соседними точками

- угол разориентировки между зерном и двойником до прохождения через границу и после не изменился, это видно из рисунка 3.20.

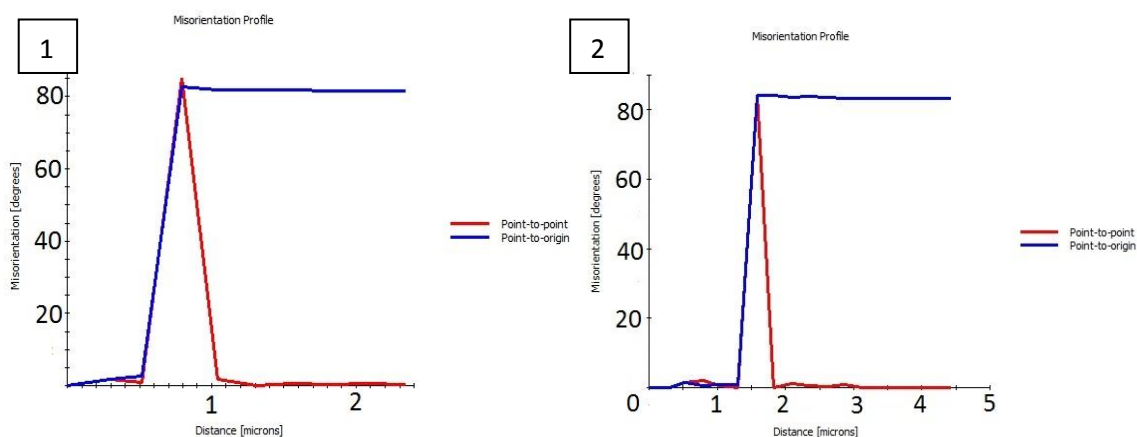


Рис. 3.20 Графики зависимости разориентации зерен между зерном и двойником лежащих вдоль линии 1) P1; 2) P2. Синяя кривая соответствует разориетировке между начальной и текущей точкой. Красная кривая соответствует разориетировке между двумя соседними точками

3.4 Экономическое обоснование внедрения разработки

Техническая эффективность от применения титана по сравнению со многими традиционными материалами не нуждается в дополнительных доказательствах- она очевидна. Все ключевые моменты были описаны в обзоре литературы и подтверждены результатами наших исследований.

Вопросы экономической эффективности более сложны. В ранних работах обращалось внимание на значительно более высокую цену титановых полуфабрикатов по сравнению с другими металлами и сплавами, на основании чего делался вывод о существенном удорожании деталей или конструкций при изготовлении их из титана. Однако по истечении определенного периода эксплуатации титановых конструкций, работающих в различных отраслях промышленности, был выявлен ряд важнейших факторов, которые необходимо учитывать при расчете экономической эффективности.

Так, например, стоимость единицы массы полуфабрикатов из титана дороже полуфабрикатов из качественных сталей марки 0X18H10T в 5,5-7 раз (листы), 5,2-6,3 раза (прутки). Однако с учетом малого удельного веса титана стоимость единицы объема титана (листы) лишь в 1,6-2 раза выше стоимости стали 0X18H10T, а в сравнении с листовой высоколегированной сталью 0X23H28M ниже на 43%. Высокая прочность большинства титановых сплавов позволяет применять в ряде конструкций профили малого сечения, что приводит к уменьшению их массы и объема (что как раз немаловажно при конструировании низкофоновых детекторов).

В большинстве промышленных агрессивных сред издержки, обусловленные потерями металла с равных площадей за одинаковый период времени, при использовании титана значительно ниже, чем в случае применения нержавеющей стали. Соответственно, стоимость титанового оборудования оказывается лишь в 2-3 раза выше, чем стоимость стального, а

в ряде случаев- одинаковой. Высокая коррозионная стойкость титана обуславливает значительно более долгий срок службы изделий , работающих в агрессивных промышленных средах, по сравнению с изделиями из таких материалов, как чугун, углеродистые и легированные стали, что существенно снижает затраты на ремонт и переоборудование.

Таким образом, при расчете экономической эффективности кроме первоначальной стоимости изделия необходимо учитывать следующие факторы: уменьшение массы конструкции при сохранении ее надежности; возможность создания принципиально новых механизмов и изделий, технологических процессов, внедрение комплексной механизации и автоматизации; увеличение срока службы изделия, а следовательно, сокращение простоев и затрат на ремонт, уменьшение численности ремонтного персонала; возможность использования более агрессивных сред, высоких давлений и температур; использование более коротких технологических схем и улучшение качества за счет ликвидации коррозии.

Выводы

1. Для механических двойников, зарождающихся концентрированным напряжением при помощи внешней нагрузки на алмазную пирамидку, проходящих через границу наблюдаются увеличения значения энергии акустической эмиссии на два порядка.
2. При прохождении двойника через границу было зафиксировано отклонение направления роста двойника на 25° по отношению к первоначальному.
3. При малых напряжениях, двойник взаимодействуя с дефектом не может продолжать свой рост.
4. Малоугловые границы с небольшими углами разориентировки (измеренные нами 3° и 8°) могут служить препятствием для роста механического двойника. Однако случаи когда двойники проходили через малоугловые границы в наших исследованиях также были зафиксированы (измеренный нами 14°).
5. Место и время появления двойника заранее предсказать невозможно, поскольку их зарождение активизируется еще и случайными концентраторами напряжений, роль которых выполняют также скрытые внутренние дефекты структуры.
6. Установлено, что для всех измеренных нами двойников угол разориентировки между ними и зернами в которых они зарождались составлял около 85° , что соответствует системе двойникования $\{10\bar{1}2\}$.

Список литературы

1. Марьин Б. Н., Семашко Н. А., Шпорт В.И. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002, 240с.
2. Капырин Г.И. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977, 247с.
3. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кунгурцев М.С., Гончаров И.Ю., Неклюдов И.М., Волчок О.И. О двойниковании титана BT1-0 после полного отжига. // МиТОМ, 2010, №8, с.25-29.
4. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 261с.
5. Грешников В.А., Дробот Ю.Б Акустическая эмиссия М.: Изд-во стандартов, 1976. — 276 с.
6. Модули упругости // Большая Советская энциклопедия (в 30 т.) / А. М. Прохоров (гл. ред.). — 3-е изд. — М.: Сов. энциклопедия, 1974. — Т. XVI. — С. 406. — 616 с.
7. Соболев Р.Н. Методы оптического исследования минералов. Справочник
8. Гоулдстейн Дж., Джой Д., Лифшин Э., Ньюбери Д., Фиори Ч., П. Эчлин Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Том 1
9. ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу
10. Бутиков Е.И. Кондратьев А.С. ФИЗИКА: Учеб. пособие: Механика. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008 – 352с.
11. ГОСТ 17746-96 Титан губчатый. Технические условия

12. Физика металлов и металловедение. Лабораторный практикум: учеб. пособие/ В.Г. Шепелевич. – Минск: Выш. шк., 2012. – 166 с.
13. Материаловедение: уч. пособие/ И.М. Жарский[и др.] – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 557с.
14. Титан: свойства, сырьевая база, физико-химические основы и способы получения Изд. Металлургия, 1983. – 557с.
15. Зубков Л.Б. 'Космический металл. Все о титане' - Москва: Наука, 1987 - с.128.
16. Редкол.: Зефилов Н. С. (гл. ред.). Химическая энциклопедия: в 5 т. — Москва: Советская энциклопедия, 1995. — Т. 4. — С. 590-592. — 639 с. — 20 000 экз. — ISBN 5—85270—039—8.
17. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кунгурцев Е.С., Кунгурцев М.С. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 10. С. 44–48.
18. Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин "Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов" с.50-54
19. Н.И. Уткин "Металлургия цветных металлов" с. 12-24
20. Г. А. Соболев, А. В. Пономарев, А. В. Кольцов, Б. Г. Салов, О. В. Бабичев, В. А. Терентьев, А. В. Патонин, А. О. Мострюков — «ВОЗБУЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ УПРУГИМИ ИМПУЛЬСАМИ»
21. Стоев П. И., Папилов И. И. Акустическая эмиссия титана в процессе деформации. // Вопросы атомной науки и техники, 2007, № 4, Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (16), с.184 - 191.
22. Дручинина О.А., Камышанченко Н.В., Колесников Д.А., Никулин И.С. Особенности двойникования в отожжённом и закалённом сплаве титана ВТ 1-0. Сборник докладов всероссийской школы-

- семинара молодых ученых и преподавателей «Функциональные и конструкционные наноматериалы». // Издательство БелГУ, 2008, с. 91-93.
23. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кунгурцев М.С., Неклюдов И.М., Волчок О.И. – Развитие механического двойникования, вызванного действием сосредоточенной нагрузки в титане марки BT1-0. Сборник материалов Третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-09, Москва, 12-15 октября 2009. – М: Интерконтакт Наука, 2009, с71.
24. Цвикер У. Титан и его сплавы. Пер. с нем. Берлин – Нью-Йорк. – М., Металлургия, 1979, 512 с.
25. Р. Хоникомб. Пластическая деформация металлов. / Пер. с англ. под редакцией Б.Я. Любова. – М.: Мир, 1972, 408с.
26. Чикова Т.С. Физика и механика деформационного двойникования металлов. Дис. д-ра физ-мат. наук: 01.04.07 – М.: РГБ, 2005, 281с.
27. Камышанченко Н. В., Никулин И.С., Гончаров И.Ю., Неклюдов И.М. Макроскопическое описание явления двойникования в отожженном титане BT1-0 в результате воздействия концентрированного напряжения. // Вестник Тамбовского Университета. Серия: Естественные и технические науки. Т.15, вып.3, 2010, с.1208-1212.
28. Савенко В.С., Остриков О.М. Поля напряжений у границы клиновидного двойника. // Письма в ЖТФ, 1997, том 23, № 22.
29. Старцев В.И., Бенгус В.З., Комник С.Н., Лаврентьев Ф.Ф. Взаимодействие дислокаций при двойниковании кристаллов. // Кристаллография, 1963, т.8, № 4, с.632-640.
30. Поллок А. Металлы (METALS HANDBOOK). ASM International, 9-ое издание, т. 17, 1989, с. 278 – 294.

31. Старцев В.И., Бенгус В.З., Комник С.Н., Лаврентьев Ф.Ф. // Кристаллография. 1963. Т. 8. № 4. С.632–640.
32. Старцев В.И., Лаврентьев Ф.Ф. // Кристаллография. 1958. №3, с.329–333.
33. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Новый вид взаимодействия двойникования и скольжения, ДАН СССР, том 259, №3, 1981, с. 582-583.
34. Савенко В.С. Новые каналы реализации механического двойникования. Письма в ЖТФ, том 24, №9, 1998, с. 43-49.
35. Федоров В.А., Тялин Ю.И., Тялина В.А. Дислокационные механизмы разрушения двойникующихся материалов. М.: Издательство Машиностроение-1, 2004, 336с.
36. Гарбер Р.Н. Образование упругих двойников при двойниковании кальцита// Докл. АН СССР, 1988, т.21, №5, с.233-235.
37. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Гальцев А.В., Беленко В.А., Гальцева И.Н., Мишунин М.В. Влияние отклонения направления приложенного напряжения по отношению к оси Z базовой плоскости Ti_α на процесс механического двойникования. – Тамбов: III международная конференция, 2016.
38. Акчурин М.Ш. Особенности деформирования кристаллов сосредоточенной нагрузкой. Автореферат дис. докт. физ.-мат. наук. – Москва, 2001. – 30с.
39. Булычев С.А., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностных слоях и в микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор)// Физ. и хим. обработка материалов – 1979, №5, с. 69-81.
40. Физическое материаловедение: учебник для вузов: в 6т/ Под общей редакцией Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2007. Т.1. физика

- твёрдого тела/ Г.Н. Елманов, А.С. Юровских, В.Н. Скрытний, Е.А. Смирнов, В.Н. Яльцев. – М.: МИФИ, 2007. – 636с.
41. Методы исследования текстур в материалах: учеб.-метод. пособие/М.Л. Лобанов, А.С., А.С. Юровских, Н.Н. Русаков. – Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2014. – 115 с.
42. Бойко В.С., Гарбер Р.Н., Кившик В.Ф., Кривенко Л.Ф. Синхронная регистрация перемещения дислокаций и генерируемого или звукового излучения. – ФТТ, 1975, №5, с.1541-1543.
43. Бойко В.С., Гарбер Р.Н., Кривенко Л.Ф., Кривуля С.С. Звуковое излучение двойникоующих дислокаций. – ФТТ, 1970, т.12, №6, с. 1753-1755 с.
44. Минц Р.Н., Мелехин В.П., Иевлев И.Ю., Бухаленков В.В. Акустическое излучение при мартенситной реакции. – ФТТ, 1982, т.14, вып.5, с.1582-1583.
45. Солдатов В.П. О некоторых особенностях двойникования монокристаллов цинка при низких температурах// Физ. металлов и металловедение. – 1967, т.24, №4, с. 744-753.